

不同类型沉积物磷形态转化及其对狐尾藻生长的影响

王圣瑞¹, 赵海超^{1,2}, 杨苏文¹, 易文利¹, 金相灿¹

(1. 中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012; 2. 河北北方学院农林科技学院, 张家口 075131)

摘要:在室内模拟条件下利用不同类型沉积物培养穗状狐尾藻, 分析了沉积物与上覆水各形态磷的变化, 以及狐尾藻生物量和根系形态的差异, 揭示不同沉积物中各形态磷的转化特性及其对沉水植物生长的影响. 结果表明, 在研究条件下, 外加细沙改变了沉积物的颗粒度, 促进沉积物中磷的释放, 增加了上覆水磷浓度; 外加氮源, 改变沉积物的化学性状, 抑制沉积物中磷的释放, 降低了上覆水中磷的浓度; 添加细沙使狐尾藻植株及根系干重增加了 49% 和 107%, 根长增加了 19%; 而外加氮源对植株根系生长产生了抑制作用, 使狐尾藻早衰; 狐尾藻生长促进了沉积物中磷的释放, 其衰退增加了沉积物中磷的沉积, 各形态磷随着狐尾藻的生长呈先降后升趋势, 其中以 Fe/Al-P 变化量最大 (41% ~ 57%); 根系长度是影响狐尾藻对沉积物中磷吸收和释放的主要形态指标, 根直径主要通过影响沉积物的通透性间接促进沉积物中磷的释放.

关键词:沉积物; 磷形态; 狐尾藻; 迁移; 根系形态; 生物量

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)11-2666-07

Effect of Different Type Sediments on Transformation of Phosphorus Forms and Growth of *Myriophyllum spicatum*

WANG Sheng-rui¹, ZHAO Hai-chao^{1,2}, YANG Su-wen¹, YI Wen-li¹, JIN Xiang-can¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Research Center of Lake Eco-environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Department of Agricultural Science, Hebei North University, Zhangjiakou 075131, China)

Abstract: The changes of the different phosphorus (P) forms in sediments, overlying water and the diversity of dry weight and root forms of *Myriophyllum spicatum* were studied using different type sediments under simulating condition. The characteristic of transformation of P forms and growth of submerged plant *Myriophyllum spicatum* were illustrated. The results indicated that the P release was promoted by adding the silver sand in sediment, and their P concentrations in the overlying water were increased. The chemical characteristic of the sediments were changed by adding NH_4Cl , which restrained the P release from their sediments and decreased the P concentration in their overlying water. About 49%, 107% of their plant, root dry weight and 19% root length of *Myriophyllum spicatum* from different treatments were raised by adding silver sand in sediments. The root growths of the *Myriophyllum spicatum* from different treatments were restrained and their agings were promoted by adding NH_4Cl in sediments. The P release from sediments were accelerated by the growth of *Myriophyllum spicatum*, and the early decay of *Myriophyllum spicatum* can increase the P accumulation in sediment. The changing trend of different P forms in the sediments decreased firstly, and then increased with the *Myriophyllum spicatum* growthing, their contents of Fe/Al-P form in sediments varied greatly (41% - 57%). The P release and adsorption in sediments were mainly affected by their root length index of *Myriophyllum spicatum* from different treatments. The P release in sediment was accelerated through their changing penetrate capacity by root diameter increasing.

Key words: sediment; phosphorus forms; *Myriophyllum spicatum*; transformation; root forms; biomass

沉积物作为湖泊营养物质的重要储蓄库, 是水体营养物质的重要来源. 沉积物与上覆水中磷可相互迁移, 在一定条件下, 沉积物中磷的释放可以维持水中较高的磷浓度水平^[1]. 沉积物的理化性状对于沉积物中磷的释放具有重要的影响. 因此明确不同沉积物中磷在沉积物-水界面的迁移规律对于控制湖泊富营养化起着关键的作用^[1,2]. 沉水植物占据了湖泊上覆水和沉积物的主要界面, 是水体两大营养库间的有机结合部, 对湖泊生态系统物质循环过程具有重要的影响. 水体和沉积物中的营养物质含

量及其转化对沉水植物的生长具有重要的影响, 尤其是氮氮对植物生长的影响尤为显著, 氮素增加可促进植物的生长, 但其浓度过高也会抑制植物的生长^[3]. 穗状狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*) 在我国浅水湖泊及河流分布较广是长江中下游浅水湖泊中重要的沉水植物之一, 因其适应性较强, 生物量积累较

收稿日期: 2009-11-28; 修订日期: 2010-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40703017, 40873079); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07105-005)

作者简介: 王圣瑞 (1972 ~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为湖泊富营养化, E-mail: wangsr@craes.org.cn

快,及其对蓝藻具有化感作用在富营养化湖泊的生态修复中应用较广^[4]. 本研究通过在底质中外加氮源及细沙培养穗状狐尾藻,分析水体中磷形态的变化及其迁移规律及穗状狐尾藻的生长状况,探讨不同沉积物中磷形态的迁移和对沉水植物生长的影响,以期对富营养化水体的治理和生态修复提供一定的理论参考.

1 材料与方法

1.1 供试植物与实验设计

试验所用穗状狐尾藻取自北京房山区一渡附近,在温室内预培养 2 周,选择长势一致的健康顶枝(长 10 cm)为试验材料. 沉积物取自中国环境科学研究院(人工湖泊)池塘,自然风干后用重物捣碎,过 0.5 mm 细筛 1~2 次,混匀去除杂质,使沉积物样理化性质均匀一致. 底质设为 3 个处理,处理 1:沉积物和细沙按 2/1 比例混合;处理 2:沉积物;处理 3:沉积物 + NH₄Cl(以 10 g NH₄Cl:3 kg 基质). 其理化性质如表 1.

表 1 不同处理沉积物基本理化性质
Table 1 Basic characteristics of tested sediment

沉积物	总 N /mg·kg ⁻¹	总 P /mg·kg ⁻¹	有机质 /%	pH
沉积物 + 细沙	391.94	498.07	1.56	9.67
沉积物	536.48	585.05	2.27	9.98
沉积物 + NH ₄ Cl	1 120.34	585.05	2.18	8.57

试验设 6 个试验组,每组在 1 m × 1 m × 0.8 m 的玻璃缸内设 15 个 PVC 小桶(高 × 直径 = 16.0 cm × 18.0 cm),上底面积 254.34 cm²,体积 3 000 mL,每桶装 3 kg 底质. 其中 3 组底质培养穗状狐尾藻,每桶栽 10 株狐尾藻,另设 3 组对照(CK)组不种植物. 用自来水培养,玻璃缸内定期补充培养水. 试验在人工玻璃温室内进行,光照为温室内自然光照,温度控制在 20~30℃ 之间. 从 2008 年 6 月~2008 年 9 月定期取样 5 次(每次各组取 3 桶,09:00 取样),分别在 2008 年的 06-28、07-17、08-10、09-06、09-26 采集不同处理上覆水、沉积物、植物样品. 上覆水样品采集水面以下 30 cm 处,用于分析总磷(TP)、溶解性磷(DTP)、溶解性反应磷(RSP);沉积物样品分析不同形态磷;植物样分析生物量及根系形态(根长、根直径).

1.2 分析方法

总磷及无机磷形态采用 SMT 法测定^[5,6],沉积物中磷分为铁铝氧化态磷(Fe/Al-P)、钙结合态磷(Ca-P)、总磷(TP)、无机磷(IP)、有机磷(OP)5 种.

上覆水 TP 的测定,采用过硫酸钾氧化法,DTP 浓度的测定,水样过 0.45 μm 孔径的醋酸纤维滤膜,采用过硫酸钾氧化法;SRP 浓度的测定,水样过 0.45 μm 孔径的醋酸纤维滤膜,采用钼蓝比色法. 颗粒态总磷(PP)浓度为 TP 浓度与 DTP 浓度之差,溶解性有机磷(DOP)浓度为 DTP 浓度与 SRP 浓度之差^[7]. 每个样品均重复测定 3 次. 根长、根直径,采用线绳法^[8]. 植物干重,采用烘干法.

1.3 数据分析方法

试验数据用 SPSS 统计软件进行分析,平行测量误差 < 5%.

2 结果与分析

2.1 不同处理沉积物-水磷形态转化的差异

2.1.1 不同沉积物中各形态磷的变化

不同处理沉积物中各形态磷变化如图 1 所示. 总磷和各形态无机磷随着培养时间的延长总体呈下降趋势,有植物组下降幅度大于无植物组,有植物组后期略有上升;无植物组有机磷均呈下降趋势,有植物组处理 1(外加细沙)呈先上升后下降趋势,处理 2(沉积物)、3(外加 NH₄Cl)呈先下降后上升趋势. 随着培养时间的延长沉积物中各形态磷以 Fe/Al-P 变化量最大(41%~57%),其他形态磷变化相对较小. 可见沉积物释放和植物吸收利用的主要是铁铝氧化态磷^[9,10],这是因为 Fe/Al-P 包括 Fe、Mn、Al 氧化物及其氢氧化物所包裹的磷(不稳定态磷也包括在其中),这部分磷活性较强. 而 Ca-P 包括与 Ca 结合的各种磷,该部分磷不易释放、难为生物所利用. 不同处理 Fe/Al-P 变化量大小顺序为处理 1 > 处理 2 > 处理 3. 这是因为处理 1 中含有部分沙粒,增大了沉积物的孔隙度. 有研究表明,粗沙粒沉积物孔隙度大,因而含氧量较高,易形成氧化锰、氧化铁以及铁的磷酸盐,因而有可能形成磷的高值区^[11]. 处理 3 的 Fe/Al-P 变化量小,可能的原因是处理 3 外加氮源影响了底质环境,降低了底质 pH 值,研究表明^[12,13] pH 较低时,沉积物释磷主要以溶解为主, pH 高时,体系中 OH⁻ 可与无定型铁铝胶合体中的磷酸根发生交换,促进磷的释放;同时外加氮源,增加了水体 NO₃⁻ 含量,高的 NO₃⁻-N 浓度使铁处于氧化状态从而增加表层沉积物对磷酸根的吸附能力,对磷的释放有抑制作用^[14,15]. 可见外加细沙主要影响沉积物的通透性促进磷的释放,外加氮通过改变沉积物的营养状况及环境抑制沉积物中磷的释放.

底质的理化性状是影响沉积物中磷迁移转化的

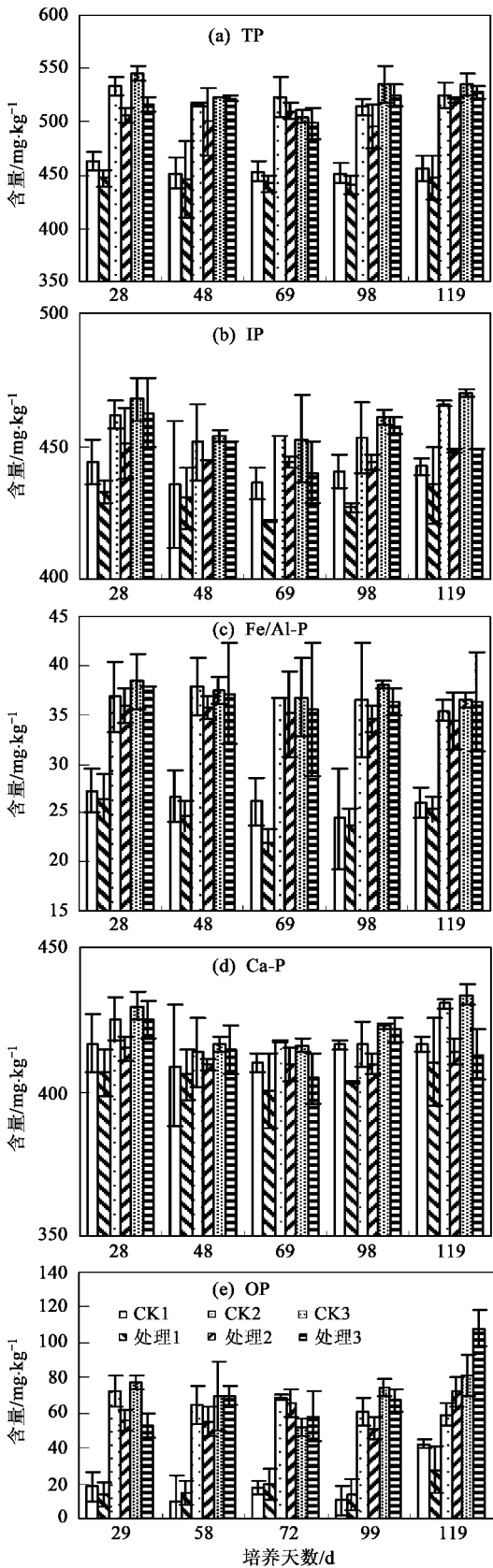


图 1 沉积物样品中各形态磷随时间的变化曲线
Fig. 1 Changes of phosphorus forms with different time in the sediment samples

主要内因,水生植物的生长及其分泌物是影响沉积物中磷迁移转化的重要生物因素.从图 1 可见,无植物组(CK)变化量均小于有植物组(处理),特别是钙结合态磷差异较大,表明穗状狐尾藻不但能吸收底质中的磷,同时能够促进底质中磷的释放转化,特别是促进钙结合态磷的活化与释放.穗状狐尾藻的生长不仅吸收水体中的磷还通过改变环境增加各形态磷的活性.金相灿等^[16]研究表明,沉水植物是磷在底质和水体中分配的重要影响因子. IP 含量随着培养时间得延长,有植物组下降幅度大于无植物组.表明穗状狐尾藻主要利用沉积物中的 IP,同时能破坏 IP 在水体与沉积物之间的动态平衡,使 IP 向水体中释放.培养后期有植物组中有机磷明显升高,主要是穗状狐尾藻腐烂沉积所致.由于活性有机磷可直接或间接为植物所吸收^[17],因此,与无植物组相比,有植物组有机磷变化较大.

2.1.2 不同沉积物对上覆水中各形态磷浓度的影响

不同处理上覆水中各形态磷浓度变化如图 2 所示. + 来看,TP 浓度大小顺序为处理 1 > 处理 2 > 处理 3;处理 1 后期 DTP 和 DOP 较高,中期 SRP 和 PP 较高.随着时间的延长各形态磷变化不同,各处理 TP 和 DTP 均呈先下降后上升的趋势;处理 1 中 SRP 呈波浪式变化,处理 2 中 SRP 呈先下降后上升的趋势,处理 3 中 SRP 变化较小;各处理 PP 呈下降趋势;处理 1、2 中 DOP 呈波浪式变化,处理 3 中 DOP 呈先下降后上升趋势.表明沉积物中加入细沙有利于磷的释放,因为沉积物空隙度加大能促进磷向水体释放,特别是活性磷和颗粒态磷.沉积物中外加氮源抑制沉积物磷的释放,这与 Andersen^[18]研究结果一致,外加氮源增加水中硝酸盐的浓度,使水体氧化性增强,因而抑制磷的释放.各形态磷浓度在培养 69 d 时较低这与狐尾藻的生长有关,此时狐尾藻生长旺盛,对磷营养的需求量较大,使磷浓度下降;119 d 磷浓度升高,因为此时穗状狐尾藻逐渐衰退,吸磷量减少、生物体腐烂释放磷^[19].沉积物释放及生物利用的主要是溶解态的磷,如图 2 所示,上覆水中各形态磷以 DTP 为主. SRP 是水生植物直接利用的主要磷形态,SRP 受到底质性状和水生植物生长影响较大, DOP 是水体中潜在的磷源,穗状狐尾藻的生长促进底质中有机磷的释放,同时可以转化和吸附水体中的有机磷,后期穗状狐尾藻衰退腐烂释放有机磷. SRP 的分布与 DTP 的分布相似,这表明它们之间存在着一定的关系,采用非参数分析中

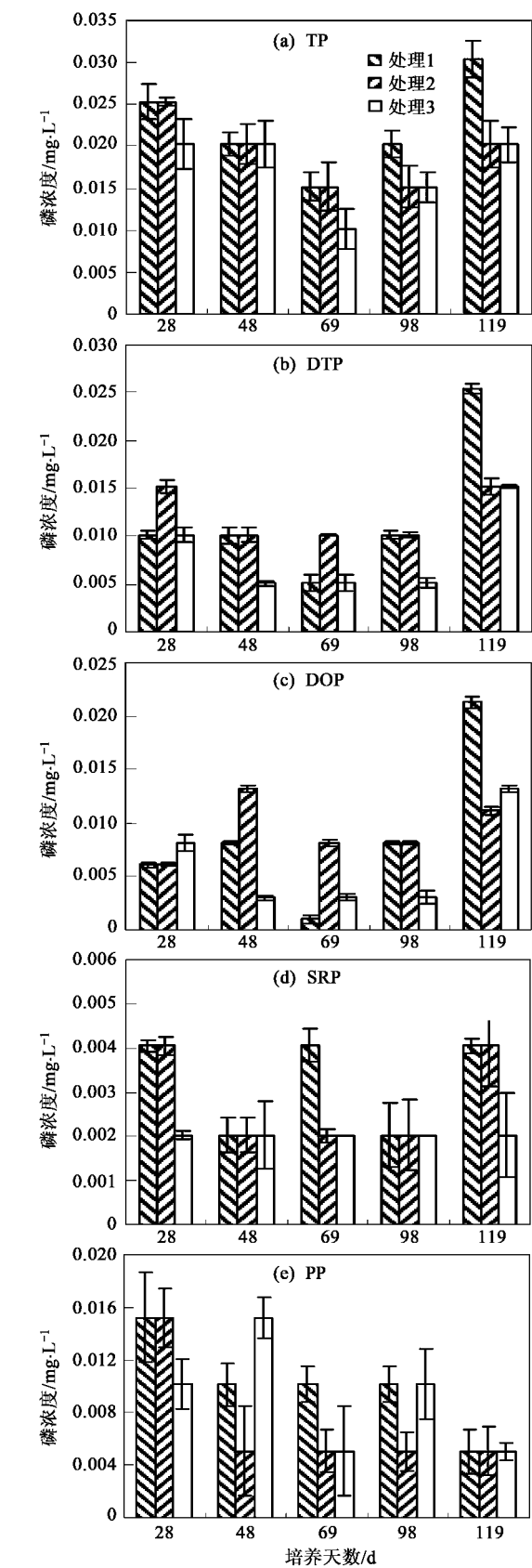


图2 不同处理上覆水磷形态浓度的变化
Fig.2 Variability of the phosphorus forms concentrations
in the overlying water

Spearman 秩相关系数来考察它们之间的相关性,结果见表 2. 可以看出,DTP 与 SRP 和 DOP 均有显著的正相关性,说明 SRP 和 DOP 的变化均能影响到 DTP 的变化.

表 2 不同形态磷之间 Spearman 秩相关系数¹⁾

	SRP	DTP	TP	PP	DOP
SRP	1.00	0.580 *	0.641 *	0.183	0.154
DTP		1.00	0.760 *	-0.301	0.793 *
TP			1.00	0.300	0.436
PP				1.00	-0.654 *
DOP					1.00

1) * 表示其相关性显著 ($p < 0.05$)

2.2 不同沉积物对狐尾藻生长的影响

2.2.1 不同沉积物对狐尾藻生物量的影响

生物量是反映植物生长状态的重要指标,同时对沉水植物净化水体的能力具有重要的影响. 不同底质培养的穗状狐尾藻生物量累积变化如图 3 所示. 随着培养时间的延长各处理穗状狐尾藻干重均呈“抛物线”型变化,且在第 28 d 达到最大值. 植株总生物量大小顺序为处理 1 > 处理 2 > 处理 3. 在培养的第 98 d 后,处理 1、2 穗状狐尾藻开始腐烂,处理 3 在培养的 48 d 后开始腐烂. 同时,处理 1、2 穗状狐尾藻衰退速率较慢,开始衰退后 22 d 仍有部分绿叶,而处理 3 衰退速率较快,在开始衰退后 15 d 左右就完全腐烂. ANOVA 处理结果显示,不同处理穗状狐尾藻生物量的累积差异显著 ($p = 0.035, p < 0.05$). 穗状狐尾藻根干重随培养时间的延长各处理均呈“抛物线”型变化,且处理 1、2 最大值出现在 98 d,处理 3 出现在 48 d 并且 48 d 后已腐烂衰退,大小顺序为处理 1 > 处理 2 > 处理 3. 这与总生物量的变化趋势一致. ANOVA 结果显示,不同处理根生物量差异极显著 ($** p = 0.01$). 表明沉积物加入部分沙粒,有利于穗状狐尾藻生物量的积累及根系的生长,添加细沙使穗状狐尾藻植株及根系干重增加了 49% 和 107%. 因为沉积物中加入沙粒增大了沉积物的孔隙度,进而增加底质的含氧量从而促进根系和植株的生长. 而外加氮源并没有促进植株的生长,反而抑制了植株生长. 前人研究发现在氮营养缺乏的 N^- 环境中,增加氮素供应会促进植物生物量增加,但是当氮素供应过量时则可能会抑制植物的生长^[4]. 外加氮源增加了底质中氮的含量,从而使水体中氮含量增加,加强了水体对穗状狐尾藻的富营养作用. 宋长春等^[3]研究表明在一定氮素输入条件下,植物地上生物量明显增加,植物的碳积累量增

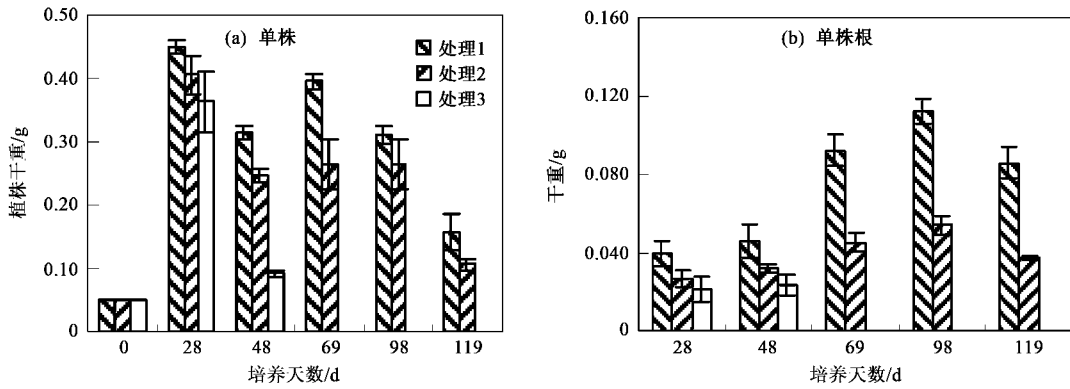


图3 沉水植物穗状狐尾藻生物量与根重随时间的变化曲线
Fig.3 Changes of biomass and root biomass of grown with different time

加;但过多的氮素输入则不利于碳的生物累积,即氮素量超过一定的水平又会抑制湿生植物的生长。

2.2.2 不同沉积物对穗状狐尾藻根系形态的影响

穗状狐尾藻是根系较为发达的沉水植物^[20],根系是吸收养分的重要器官,不同处理穗状狐尾藻根系形态变化如图4所示。主根平均根长随着培养时间的延长,各处理均呈先升高后降低趋势,处理1根长比处理2增加19%,比处理3增加142%。通过ANOVA分析可知,不同处理间植株主根平均根长有显著的差异($p < 0.05$)。不同处理根系直径在前期(48 d前)变化不大,随后逐渐降低。其中处理1变化幅度较大。通过ANOVA分析可知,不同处理间主根直径有显著的差异($p < 0.05$)。可见底质加入细沙可以促进穗状狐尾藻根系的伸长,外加氨氮抑制穗状狐尾藻根系的伸长。根系长度和根系直径通常作为植株适应环境能力的一个指标。根长并粗壮

的根系比根短瘦弱的根系更能有效地利用环境中的营养物质^[21~23]。处理1混合一定的沙子,降低底质养分含量,增大沉积物的通透性,使植株拥有壮根能更有效地吸收沉积物的营养,促进植株的生长。处理3主根根长较短,直径在48 d时高于其他处理,之后根系开始衰退。因为氮素是植物生长的必需元素,适当增加 NH_4^+ 供氮量可以促进植物根系的发育^[24,25],但是,高氮胁迫条件下也可能会对植物生长产生不利影响,使根系生长和养分吸收量降低^[26]。一方面,大量的氨氮的供应会增加根系活性氧的累积,另一方面,因为根系周围环境长期处于还原状态,导致高铁、锰等一些物质处于还原状态,这些高还原物质会对根系产生毒害作用,从而使根系生长受阻,进而影响整植株生长^[27]。本研究中穗状狐尾藻根系是扦插以后生成的,可以看出其根系生长明显受到了不同处理底质性状影响。

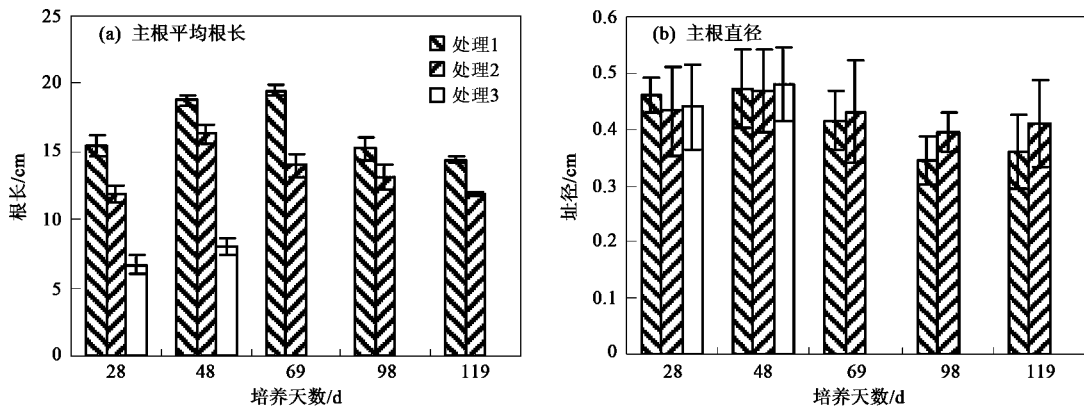


图4 沉水植物穗状狐尾藻主根平均根长和主根直径随时间的变化
Fig.4 Changes of root length and root diameter of growth with different time

通过图 1 可见穗状狐尾藻根长变化与底质中磷的变化趋势相反,而且 3 个处理变化的大小顺序相同,对主根平均根长与底质中各形态磷进行相关分析,相关系数如表 3 所示. 处理 3 根系生长时间较短,所以根系长度与底质中磷的相关性较小. 从处理 1、2 的相关分析可见,IP 和 Ca-P 与主根长度相关系数较大均呈负相关. 表明狐尾藻根系的伸长可以促进沉积物中 IP 和 Ca-P 的释放和转化. 主根长度与 TP 的相关系数为负值,但系数较小,可能是因为底质中磷含量相对于释放到上覆水中的磷量大得多,根系对总磷量的影响相对较小. 处理 1 根系长度与 Fe/Al-P 的相关系数为负值,处理 2 的为正值,且处理 1 是处理 2 系数的 2 倍. 因为 Fe/Al-P 是沉积物中的活性磷,其变化受多方面因素控制,当根系长

度较大及根系活力较强时(处理 1),Fe/Al-P 的释放才受控于根系. 根系长度与 OP 的相关性,处理 1 呈正相关,处理 2 呈负相关,且处理 1 相关系数远大于处理 2. 可见当根系量较大时,根系的脱落物、分泌物及根系的腐烂增加沉积物中有机磷的积累. 同时根系可以促进沉积物中有机磷的释放. 主根直径与底质中不同形态磷进行相关分析,结果见表 4. 各形态磷与主根直径的相关系数小于各形态磷与主根长度的相关系数. 可见根长对沉积物中磷的影响大于根粗. 从相关系数可见根粗主要影响总磷和 Fe/Al-P,可能是因为根粗能增加狐尾藻对底质中磷的利用和转化,同时根粗增加底质通透性从而增加活性磷的释放. 另外根粗对底质中有机磷的沉积具有一定的作用.

表 3 穗状狐尾藻主根平均根长与底质中不同形态磷的相关系数
Table 3 Correlativity coefficients of the average root long and different phosphorus forms in sediment

相关系数	TP	IP	OP	Fe/Al-P	Ca-P
沉积物 + 细沙	-0.336 7	-0.688 5	0.866 7	-0.640 5	-0.672 8
沉积物	-0.496 5	-0.675 5	-0.321 4	0.320 0	-0.788 1
沉积物 + NH ₄ Cl ₄	0.093 7	0.467 9	-0.291 9	0.860 5	0.412 3

表 4 穗状狐尾藻主根直径与底质中不同形态磷的相关系数
Table 4 Correlativity coefficients of root diameter and different phosphorus forms in sediment

相关系数	TP	IP	OP	Fe/Al-P	Ca-P
沉积物 + 细沙	0.393 0	0.043 8	0.301 6	0.266 3	-0.062 2
沉积物	0.792 7	-0.017 7	-0.118 3	0.751 0	-0.196 5
沉积物 + NH ₄ Cl	-0.260 7	0.504 1	-0.337 7	0.886 3	0.448 8

3 结论

(1) 沉积物通透性(颗粒度)是影响磷释放的重要物理性状,在本研究条件下,添加细沙增加沉积物的通透性,可以增加沉积物磷释放通量,还可通过改变培养沉积物含氧量促进沉积物各形态磷活化. 沉积物中氨氮含量的增加可间接地抑制沉积物磷释放. 沉积物理化性状能够通过影响沉水植物的生长间接促进或抑制沉积物中磷释放.

(2) 沉积物的理化性状对沉水植物根系形态具有重要影响,沉积物中加入细沙能够通过改变沉积物的通透性及含氧量促进狐尾藻根系的伸长,但对根直径的影响不明显,沉积物中氨氮含量的增加改变了沉积物中氮含量及形态和 pH 值等化学形状及对水生植物富营养的作用,使穗状狐尾藻根系生长受到抑制.

(3) 穗状狐尾藻不但吸收沉积物中的磷,而且能够促进沉积物中各形态磷的转化和释放. 穗状狐

尾藻主要吸收利用沉积物中的铁铝氧化态磷,狐尾藻可以活化沉积物中的钙结合态磷和有机态磷,穗状狐尾藻的腐烂沉积能够增加沉积物中有机磷的积累.

(4) 穗状狐尾藻的根系形态对沉积物中磷释放具有重要的影响,其中根系长度是促进沉积物中磷释放与转化的重要指标,根系的直径主要通过影响沉积物的通透性来促进磷的释放.

参考文献:

[1] 彭进新,陈慧君. 水质富营养化与防治[M]. 北京:中国环境科学出版社,1988. 45-62.

[2] David L C. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving water: a review[J]. Journal of Environmental Quality, 1998,27: 261-266.

[3] 宋长春,张金波,张丽华. 氮素输入影响下淡水湿地碳过程变化[J]. 地球科学进展,2005,20(11): 1249-1255.

[4] 杨旻,吴小刚,张维昊,等. 富营养化水体生态修复中水生植物的应用研究[J]. 环境科学与技术,2007,30(7): 98-102.

[5] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上

- 海科技出版社, 1978. 123-324.
- [6] Ruban J V, Lopez-Sanchez P F, Pardo G, *et al.* Quevauviller harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments; a synthesis of recent works [J]. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 2001, **370**: 224-228.
- [7] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1998. 234-245.
- [8] 张立君, 张少英. 植物生理学基础实验指导[R]. 呼和浩特: 内蒙古农牧学院. 1995. 31-33, 39-40.
- [9] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(3): 381-388.
- [10] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 浅水湖泊沉积物磷释放的重要因子—铁和水动力[J]. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(6): 762-764.
- [11] 王菊英, 刘光远, 鲍永恩, 等. 黄海表层沉积物中总磷的地球化学特征[J]. *海洋环境科学*, 2000, **21**(3): 53-56.
- [12] Bostrom B, Jansson M, Forsberg C. Phosphorus release from lake sediment[J]. *Archiv Fur Hydrobiologie*, 1982, **18**: 55-59.
- [13] Lijklema L. The role of iron in the exchange of phosphate between water and sediments [A]. In: *Interactions between sediments and freshwater* [C]. SIL-UNESCO-Symp Junk, the Hague, Amsterdam, 1977. 313-317.
- [14] Henning S J, Frede O A. Importance of temperature, nitrate, and pH for phosphorous release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(3): 557-589.
- [15] 高丽, 杨浩, 周健民. 湖泊沉积物中磷释放的研究进展[J]. *土壤*, 2004, **36**(1): 12-15.
- [16] 金相灿, 王圣瑞, 赵海超, 等. 磷形态对磷在水-沉水植物-底质中分配的影响[J]. *生态环境*, 2005, **14**(5): 631-635.
- [17] 赵少华, 宇万太, 张璐, 等. 土壤有机磷研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(11): 2189-2194.
- [18] Andersen J M. Effects of nitrate concentration in lake water on phosphate release from the sediment [J]. *Water Research*, 1982, **16**: 1119-1126.
- [19] Huebert D B, Gorham P R. Biphasic mineral nutrition of the submersed aquatic macrophyte *Potamogeton pectinatus* L. [J]. *Aquatic Botany*, 1983, **16**(3): 269-284.
- [20] 王圣瑞, 金相灿, 赵海超, 等. 沉水植物黑藻对上覆水中各形态磷浓度的影响[J]. *地球化学*, 2006, **35**(2): 179-186.
- [21] Nielsen M E, Barber S A. Difference among genotypes of corn in the kinetics of P uptake [J]. *Agronomy Journal*, 1978, **70**: 695-698.
- [22] Xie Y, An S, Yao X, *et al.* Short-time response in root morphology of *Vallisneria natans* to sediment type and water-column nutrient [J]. *Aquatic Botany*, 2005, **81**: 85-96.
- [23] Xie Y, Yu D. The significance of lateral roots in phosphorus (P) acquisition of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) [J]. *Aquatic Botany*, 2003, **75**: 311-321.
- [24] 王余龙, 姚友礼, 刘宝玉, 等. 不同生育时期氮素供应水平对杂交水稻根系生长及其活力的影响[J]. *作物学报*, 1997, **23**(6): 699-706.
- [25] 刘殿英, 石立岩, 黄炳茹, 等. 栽培措施对冬小麦根系及其活力和植株性状的影响[J]. *中国农业科学*, 1993, **26**(5): 51-56.
- [26] 宋海星, 李生秀. 水、氮供应和土壤空间所引起的根系生理特性变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, **10**(1): 6-11.
- [27] 何春娥, 刘学军, 张福锁. 植物根表铁膜的形成及营养与生态环境效应[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(6): 1069-1073.